超電導マグネットに生ずる機械的擾乱 (I)

—摩擦による擾乱の機構とその及ぼす効果—

前田 秀明, 塚本 修巳*, 岩佐 幸和**

東芝総合研究所 川崎市川崎区浮島町4-1

* 横浜国立大学 横浜市常磐台156

** Francis Bitter National Magnet Laboratory, MIT,
Cambridge, MA., 02139, USA.

(1982年4月26日受理)

Mechanical Disturbances in Superconducting Magnet (I)

—Mechanism and effect of the frictional disturbances

Hideaki MAEDA, Osami TSUKAMOTO*, Yukikazu IWASA**

Toshiba Research and Development Center;

4-1, Ukishima-cho, Kawasaki, Kanagawa.

* Yokohama National University, 156, Tokiwadai, Yokohama.

** Francis Bitter Magnet Laboratory, MIT, Cambridge, MA., 02139, USA.

(Received April 25, 1982)

Synopsis:

Frictional sliding occurs on both a microscopic and a macroscopic scale. Sliding on a microscopic scale appears as discrete events called microslips. Microslips are inherent in all sliding events and are quite different from macroscopic instabilities such as stick-slips. It is thought that the "training effect" observed in quench current data from a superconducting braid may be caused by microslips.

The mechanism of sliding motion and its effects at 4.2 K were studied in detail for a number of metal/insulator pairs that model superconducting magnet windings; the results impact the performance of superconducting magnets. Organic surface coating materials are generally effective in eliminating macroscopic instabilities. Instrumentation used in these experiments includes a high-resolution extensometer and an acoustic emission sensor, both with sensitivities capable of detecting microslips ($\sim 1 \mu\text{m}$).

1. まえがき

超電導マグネットを構成する材料は、液体ヘリウム温度付近で熱容量が極めて小さくなる。この結果、超電導磁石では微小な熱入力によって容易に常電導部が形成され、高電流密度で冷却が十分でないマグネットでは、クエンチに到る。超電導マグネットに生じるこの様な発熱源として、マグネット内部に生じる機械的

擾乱による発熱がある。この擾乱はマグネットの種類によって異なっており、代表的なものとして次の様なものがある。

- (1) 超電導線自身の機械的降伏現象に伴う発熱^{1)~6)}
- (2) 導体と絶縁体の間の摩擦運動に伴う発熱^{7)~10)}
- (3) エポキシ含浸形のマグネットに特有な、エポキシのクラックや接着のはく離に伴う発熱^{11)~13)}
- (4) バンドルコンダクターを用いたマグネットに特

有な、ストランドの動きに伴う発熱^{14)~16)}

(1)の擾乱については Patsztor と Schmidt が既に詳細に研究している^{5),6)}。本論文は(2)~(4)の機械的擾乱について、その発生頻度、エネルギー、持続時間、マグネットのクエンチ電流のトレーニング現象との関係などについて詳細に研究したものである。論文は3編に分け各編で(2)~(4)の擾乱について述べる。

本編では摩擦発熱による擾乱について報告する¹⁷⁾。

あるタイプの超電導マグネットにおいては、導体と絶縁体の間の摩擦運動に伴う発熱がマグネットの特性を著しく劣化させる。摩擦発熱をおさえるためには、そのメカニズムを十分把握する必要がある。この目的のために、我々は従来種々の金属/絶縁体の組み合わせについて、4.2Kでの摩擦現象の研究を組織的に行ってきた^{18)~22)}。

第1の実験では“pin on disk type”と呼ばれる装置を用いて、4.2Kで動摩擦係数 μ と運動速度 v との関係を測定した。 μ - v 曲線が正の傾きをもつ様な速度領域では、安定な摩擦運動が得られると言われている。超電導マグネットにおいては、導体がスムーズで安定な摩擦運動をする限りは、発熱を十分に小さなものにおさえる事ができる。それ故、 μ - v 曲線ができるだけ広い速度領域で、正の傾きをもつような導体と絶縁体の組み合わせを、マグネットに用いることが望ましい。実験では、4.2Kにおいて v を一定に保ちながら μ を測定し、種々の金属/絶縁体について μ - v 曲線を求め、この様な望ましい組み合わせを搜した^{18),19)}。

第2の実験は“linear type”と呼ばれる装置を用いて、2つの材料を互いにクランプした後、一方の材料に接線方向の力を加えて、過渡的摩擦運動の様子を測定したものである²¹⁾。この実験では接線方向の力を徐々に増加させることにより、実際のマグネット内部で、電磁力が徐々に増加する状態を良く模擬した実験を行うことができる。摩擦運動については既に上述した様に、金属/絶縁体の組み合わせにより、その様子が異なり、(1)スムーズでゆっくりした運動をするタイプ(以下安定なタイプと略す)と(2)急激な加速運動をするタイプ(以下不安定なタイプと略す)とに分けることができた^{20),21)}。

本報告では、上述の2番目の装置を用いて、過渡的な摩擦運動の様子を、さらに高い精度で測定した結果を報告する。十分な測定精度を得るために(1)超電導コイル/ピックアップコイル対(0.1 μ mまでの運動を判別できる)と(2)アコースティックエミッション(以

下 AE と略す) センサーを測定に使用した。これらの装置によって、極めて微小なスリップ現象をも的確にとらえることができた。実験は超電導マグネットに良く使われる金属/絶縁体の組み合わせについて行った。

2. 実験装置、実験方法、材料

2.1 実験装置と実験方法

実験装置をFig. 1に示す。ブロックAが、2枚の板Bの間にクランプ力 F_n で(通常2000N)クランプされている。これに接線方向に力 F_t を図の様に加えた(この結果各摩擦面には $F_t/2$ の力が加わる)。 F_t は0から10 NS⁻¹の増加率で徐々に増加した。 F_n と F_t はクライオスタットの外にある圧力シリンダーから、ステンレスの棒を介して、試料部まで伝えた。 F_n , F_t は圧力シリンダーと高圧窒素ガスボンベの間に取り付けた圧力変換器により測定した。本装置の詳細については文献2)に既に記述したので、ここでは省略する。

ブロックAの変位量は、変位測定用の差動変圧器(以下LVDTと略す)により測定した。この変位計は周波数特性が1 kHz、変位精度が10 μ mであり、微視的な現象を測定するには精度が十分ではない。そこでさらに高い測定精度を得るために、超電導ヘルムホルツコイル/サーチコイル対を取り付けた。ヘルムホルツコイルは水平方向に0.03Tを作っている。このコイ

Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus.

Fig. 2 Block diagram for AE processing.

ルは永久電流スイッチ (PCS) を用いて、永久電流モードで使用する。サーチコイルをAに取り付け、ヘルムホルツコイルの間に置いた。サーチコイルはヘルムホルツコイルに対して自由に動くことができる。AB間の相対的な変位は、サーチコイル電圧として検出される。変位が微小な場合には出力電圧は摩擦運動の速度に比例する。この速度計を使用することにより、LVDTに比べて、10倍以上高い周波数特性と変位測定精度を得ることができた。

微小なスリップでも、AE を発生する。この AE をとらえればスリップの発生を知ることができる。この様に AE のセンサーは微小なスリップの高感度な detector になる。そこで、摩擦面のすぐ近くに、AE のセンサーを取り付けた。AE の信号処理を Fig. 2 に示す。本実験では AE の計数率よりも、むしろ個々の AE パースト信号をとらえることに主眼を置いた。

以上の装置により、次の様なものを測定した。

- (1) F_t 対 LVDT 変位信号 (X-Y レコーダー)
- (2) 速度計出力電圧と AE パースト信号 (トランジェントレコーダー)
- (3) LVDT 変位信号, 速度計出力電圧及び AE パースト信号 (X-T レコーダー)
- (4) AE の計数率対 F_t (X-Y レコーダー)

2.2 材 料

安定な摩擦運動をすることを考えられる材料の組み合わせについて、主に実験した (Table 1)。また表面加工し、ガラス繊維が露出した状態の G10FRP (以下表面加工 G10 と略す) の表面に、種々の有機材料を塗布し、その効果を調べた。塗布材料については次章で述べる。銅/ナイロンの組み合わせは、不安定な摩擦運動をするタイプであると考えられるが、比較のために、この組み合わせについても測定した。

Table 1 Material pairs considered

Pulling Block (Material A)	Clamping Plates (Material B)
Copper, bare or soldered surface	Skin-surface G-10
Copper, bare or soldered surface	Machined-surface G-10
Copper, bare or soldered surface	Coated-surface G-10
Teflon	Copper, bare or soldered surface
Nylon	Bare-surface copper

3. 実験結果

3.1 安定な摩擦運動をする組み合わせにおける
マイクロスリップ

最初に銅/G10 (表面加工なし, 安定なタイプ) における摩擦運動を LVDT により測定した結果を review する (Fig. 3 の 1 番上の図)。G10 の表面は薄いエポキシの表皮でおおわれている。0 から B 点までの微小変位は、ブロック A に F_t を伝達するステンレス棒の伸びに起因する。ブロック A の macroscopic な動きは B 点をこえてからはじめて現われ始め、スムーズで安定な動きが T 点まで続く。摩擦運動の速度は、はじめ 10^{-5} ms^{-1} であり、それが徐々に増加して、T 点に達するころには 10^{-4} ms^{-1} 程度になる。T 点を越えた直後から、急加速度運動になる (これを take off と呼ぶことにする)。

速度計を利用することにより、LVDT よりもはるかに詳細に運動の様子を知ることができる。結果を Fig. 3 に示す (真中の図)。図には多くの電圧パルス (図中では線で示されている) が見られる。このパルスは LVDT ではほとんど変位が無い様な領域でも現

Fig. 3 Traces, obtained for copper/skin surface G-10 pair. (Top Trace): LVDT output; (Middle Trace): Extensometer output; (Bottom Trace): AE sensor output.

われている。変位量が十分小さい時には、サーチコイル電圧は運動速度に比例しているので、パルスを時間について積分すると、動いた距離が求まる。すなわち、各電圧パルスは微小なスリップを現わしている。0～Bでは数多くのスリップが現われるが、スリップによる変位の総和が極めて小さいために、LVDTでは何もとらえられないものと考えられる。このような微視的なスリップを、ここではマイクロスリップと呼ぶことにする。Fig. 3の1番下の図に見られるAEには、マイクロスリップに対応してAEのバーストが現われている。これは次の様なメカニズムによる。

マイクロスリップの発生は2つの材料間の接触の様子に依存している。2種の材料を接触させた時、界面における真の接触面積は、見かけの接触面積に比べてはるかに小さい²³⁾。接触は多くの接触点から成り立っている。マイクロスリップは多くの接触点でプラスチックフローが同時におこるときに生じるが、このプラスチックフローがAEのバースト信号を出す。それ故、AEのバースト信号がマイクロスリップの発生と同時に現われることになる。

F_t 対 LVDT による変位量を上記の実験について、Fig. 4に示す。B点まではステンレス棒の伸びが支配的であることが、良く示されている。take off はT点で起こっている。

摩擦運動の初期においては、マイクロスリップの発生頻度は極めて低い。Fig. 3によれば、0～Bで毎秒

Fig. 4 Tangential force vs. displacement curve, corresponding to the traces of Fig. 3.

1回程度である。この領域で得られた、マイクロスリップの1つについて、サーチコイル信号(下)とAE信号(上)をFig. 5(a)に示した。時間軸は1 ms/div., サーチコイル信号は $5 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}/\text{div.}$ に対応している。ピーク速度は $5 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$, スリップ持続時間は1 ms以下である。ここで、マイクロスリップの信号を良く見ると、0.2 msec程度の短かい時間巾をもつ振動が2～3 msecの間続き、その後1 kHz程度のゆるやかな振動波形が現われる。はじめの方の短かい時間巾をもつ振動波形から、1つのマイクロスリップは更に多くの小さなスリップから成り立っていると推定される。一方1 kHzの小さな振動は、サーチコイル支持棒の振動によると考えられる。

マイクロスリップの発生頻度はB点に近づくにつれて1桁以上増加し、毎秒20～50回になる。これにつれ

Fig. 5 Oscillograms showing microslip events at different levels of tangential force. In each oscillogram, the top trace is the AE signal and the bottom trace is the extensometer signal. Time scale is 1 ms/div. (a): A low tangential force; (b): Near point B in Fig. 3; (c): Near and at point T in Fig. 3.

てピーク速度、AE 信号が大きくなる (Fig. 5(b))。この結果、LVDT にもこの付近から変位信号が現われる様になる (Fig. 3)。B～T では更に発生頻度が増加して、ほとんど連続的に現われる様になる。

Fig. 5(c) は take off (T 点)における速度計の信号と AE 信号を示したものである。ここで速度計の信号の感度は、Fig. 5(a),(b) の $\frac{1}{5}$ であり、 $2.5 \times 10^{-2} \text{ ms}^{-1}/\text{div.}$ となっている。図には take off に伴い、discrete なマイクロスリップの発生が終了し、急激な加速運動が現われる様子が、良く示されている。

3.2 不安定な摩擦運動をする組合せにおけるマイクロスリップ

これまでは安定な摩擦運動をする材料の組み合わせにおいて見られるマイクロスリップについて説明した。ここでは不安定な摩擦運動をする組合せにおけるマイクロスリップについて述べる²¹⁾。不安定な組合せとは Fig. 6 の様に B 点と T 点が一致しており、Fig. 4 の B～T の様な安定な運動領域が無い場合をさす。図は銅/ナイロンの組み合わせである。

安定なタイプと同様に、マイクロスリップの発生は B 点に達するはるか以前に始まる。0～B におけるマイクロスリップの発生の様子は安定なタイプとほとんど変わらなかった。

Fig. 6 Tangential force vs. displacement for copper/nylon pair. Note that in this curve points B and T of Fig. 3 merge.

3.3 他の材料の組み合わせ

同様な実験を、安定なタイプに属する他の金属／絶縁体の組合せについても行った^{20),21)}。すべての組合せで同様なマイクロスリップが得られた。ピーク速度や発生頻度は組合せにより異なっていた。B点付近(Fig. 4)における AE と速度信号を、各材料について比較して述べる。

●半田塗布銅／G10（表皮付き）

半田塗布した銅の場合、ピーク速度は $2 \times 10^{-3} \text{ms}^{-1}$ であるが、これは塗布しない場合に比べて1/4である。

●銅／表面加工G10

銅／表面加工G10は不安定な摩擦運動をする。この不安定性はG10表面のガラス繊維によるものであると考えられるが、これは第1回目の摩擦運動の時だけに現われ (first slip と呼ぶ)²¹⁾、その後の run では消失して、安定な運動をするようになる。マイクロスリップのピーク速度は $2 \times 10^{-3} \text{ms}^{-1}$ である。銅表面に半田を塗布しても、マイクロスリップの大きさに変化は見られなかった。

●銅／テフロン

銅/テフロンの組み合わせは準安定な運動をする²¹⁾。この組み合わせが、実験した材料の中では1番大きなマイクロスリップが現われた。例を(B点付近)Fig. 7に示す。上の図はサーチャイル出力電圧、下の図はAE信号である。時間軸は 1 ms/div, 速度計の出力電圧は $5 \times 10^{-3} \text{ms}^{-1}/\text{div}$ である。マイクロスリップ各に 4〜5 μm の変位が生じている。発生頻度は他の場合より低い。銅表面に半田を塗布しても、マイクロスリップの様子にはほとんど変化が見られなかった。

Fig. 7 Oscillogram of a microslip event in copper/teflon pair. Top trace: extensometer output; Bottom: AE sensor output. Time scale: 1 ms/div.

3.4 表面塗布の効果

以上の結果から表面加工G10と銅の組み合わせが、マイクロスリップが非常に小さく、優れた組み合わせであることが明らかである。ところが、この組み合わせには first slip の発生という問題があり、これにより大きな擾乱が発生する可能性がある^{20),21)}。first slip はG10表面に露出しているグラスファイバーにより引き起こされると考えられるので、表面に物質を塗布し、ファイバーが銅と接触するのを防ぐならば、これを防ぐことができるのではないかと考えられる。このようにして、様々な有機材料を表面に塗布して、その効果を調べた (Table 2 参照)。この様な処置は first slip を取り除く上で極めて効果的であった。以下これを詳細に述べる。

Table 2 Organic materials used for surface-coating G-10

Number	Organic Coating Material
1	Epoxy
2	MoS ₂
3	Teflon
4	Paraffin

●エポキシ

エポキシ樹脂 (ボイドエポキシ5000) と硬化剤の混合液を G10 の表面にスプレーで吹きつけ、25〜50 μm 厚の薄いエポキシ層を熱処理により作る²⁴⁾。数回の実験によっても表面の塗装のはがれは見られなかった。

●MoS₂

2 硫化モイブデン (MoS₂) は層状の分子構造をもち、せん断強度が小さいので、摩擦係数が小さい²⁴⁾。微細な MoS₂ の粉末 (2 μm 直径) を結合剤であるエポキシと混合し、G10の表面にスプレーにより吹き付け熱処理をして表面膜を形成した。この膜は、エポキシよりも軟らかかった。

●テフロン

テフロンは極低温で摩擦係数が小さいので、低温における固体ルブリカントとして広く用いられている^{19),21)}。ここではテフロンの粉末 (直径 0.5 μm) を結合剤であるエポキシ樹脂に加え、G10表面にスプレーにより吹き付けた後、熱処理で表面膜を形成した。膜の厚さは MoS₂ と同程度であった。

●パラフィン

G10の板をパラフィン浴槽中にひたして形成した。この膜は極めて軟らかである(特に室温において)。液

体ヘリウム中で何回か摩擦運動をした後、表面層の一部がはげおちているのが見られた。この状態でも摩擦運動は安定であった。

以上述べて来たポリマーによる表面処理は、first slip を取り除く上で極めて効果的であったが、同時にこの表面処理によってマイクロスリップの様子も著しく変化した。エポキシとパラフィンの場合について、変化の様子を以下に述べる。

エポキシを塗布した場合、マイクロスリップのピーク速度は塗布しない場合に比べて5倍以上になってしまった(10^{-2} ms^{-1})。即ち、塗布により1個のマイクロスリップの大きさが大巾に増加した。

同様の結果がパラフィン塗布の場合にも見られ、マイクロスリップのピーク速度は 10^{-2} ms^{-1} に増加した。これに伴い、各スリップの変位量も $3 \sim 4 \mu\text{m}$ になった。

この様に有機物を表面に塗布することにより、first slip という macroscopic な不安定性をおさえることができたが、同時にマイクロスリップという microscopic な擾乱は増加してしまうことがわかった。

4. 検 討

4.1 マイクロスリップのメカニズム

銅/G10(表皮つき)の組み合わせについて、 F_t の増減を何回か繰り返して、マイクロスリップの発生の様子を調べた(実験の間クランプ力 F_n はリリースする事なく一定に保っている)。増減の各サイクルでは、前回のサイクルで達した F_t の最大値をわずかに越える所まで、 F_t を増加させた。5度にわたり繰り返して応力を加えた場合の F_t 対変位量(LVDT)をFig. 8に示す。この場合のマイクロスリップの発生の様子をFig. 9に示した。マイクロスリップの発生はAE信号で detect した。大きなAEは大きなスリップを表わしている。

第1回目の応力増加中に、A点以前にはAEが現われていないので、摩擦運動はこの点までまったく起こっていない。この間では F_t により支持棒が弾性的に伸びているだけである。A点から F_{t1} までは、多くのマイクロスリップとそれに伴うAEのバーストが見られた(Fig. 9参照)。 F_t を減少させていく途中でAEはまったく現われなかった。このサイクルにおける総変位量は、Fig. 8によれば $30 \mu\text{m}$ である。Fig. 9より、約30回のマイクロスリップが生じているので、各マイクロスリップによる平均変位量は約 $1 \mu\text{m}$ である。

Fig. 8 Tangential force vs. displacement for five consecutive runs.

Fig. 9 Microslip event vs. tangential force for the five consecutive runs of Fig. 8. Each vertical bar represents one microslip event; its height relates to slip distance.

第2回目の応力増加時には、マイクロスリップは力が F_{t1} を越えるまで現われない。即ち、0～ F_{t1} では支持棒が伸びるだけで、摩擦運動はまったく起こっていない。この様な振舞いは、摩擦運動に対する adhesion theory により、良く説明することができる²⁹⁾。これについては、後述する。

第3回目の応力増加時には、運動の様子は若干異なっている。この場合、マイクロスリップは F_{t2} よりもわずかに低い力で、出始める (Fig. 9)。この様な傾向は Fig. 8 でも明らかである。4回目と5回目の増加時にはこの傾向が更に明確に見られる。両方の場合共に、摩擦運動が始まる点は各々 F_{t3} , F_{t4} よりもわずかに低いレベルである。これらの振舞いは、クリープにより説明できるが²³⁾、それについては後程述べる。

2つの面が接触面に垂直な力 F_n により押し付けられると、表面同士の接合が生じる。 F_n が小さい場合、真の接触面積も小さい。 F_n を大きくすると、真の接触面積は F_n を支えきれなくなるまで増加する。ここで、接線方向に F_t なる力を加えると、既存の法線応力に接線応力が重畳することになる。もし合成せん断応力が、軟らかい方の材料の降伏限界を越えると、接線方向に新たにプラスチックフローが生じる。このプラスチックフローが、マイクロスリップであり、この結果真の接触面積が更に増加して、新たな力のバランスが得られた所でスリップは停止する²⁵⁾。 F_t の増加を止め一定値に保つと真の接触面積は一定になり、新たなマイクロスリップは生じないので、運動は停止

したままである。 F_t を減少させていっても、真の接触面積は変化しないので、次のサイクルで応力を増加させる時には、 F_t が前のサイクルの最大値（ここで力にはバランスしている）をこえるまで、新たなマイクロスリップは現われない。Fig. 8と9に示した、1回目と2回目のサイクルにおける結果は、以上に述べてきたことと良く一致している。

前に述べた様に、3～5回目のサイクルでは、 F_t が前回の最大値をこえる以前にマイクロスリップが現われ始める。これは臨界せん断応力以上でクリープが現われるためであると考えられる。

Fig. 8の平坦部にクリープの効果が明確に示されている。この場合、運動は F_t を一定値に保つても停止せず、ほぼ一定の速度で進行し続ける。 F_t をわずかに増加させるだけでも、速度が急増し、それにつれて変位量も急増するので、結果として平坦部が現われる。前章で述べた安定な摩擦運動は、主にこのクリープ現象に起因していると言われている²³⁾。

以上をまとめると、摩擦運動は局所的なプラスチックフローに始まり、徐々に真の接触面積が増加して最後にはクリープに到る。

Fig. 8, 9に示した結果は、典型的なものであり、同様な結果が、Table 1のすべての組み合わせにおいて見られた。Fig. 9に見られる様な AE 信号の不可逆的な振舞いは、カイザー効果として知られている²⁶⁾。

Fig. 8, 9の様な F_t の増減は、超電導マグネットを励消磁する際に、マグネット内部に実際に現われるものである。マイクロスリップの発生は、過去の F_t 印加の経歴に大きく依存している。それ故、もし1つのマイクロスリップがマグネットをクエンチするに十分な熱エネルギーを発生するならば、Fig. 9の結果はマグネットのトレーニングに重要な役割を果たすと考えられる。マイクロスリップがマグネットのトレーニングに及ぼす効果については次節で述べる。

4.2 マイクロスリップによるクエンチ

マイクロスリップにより超電導ブレード線がクエンチする事が観測された。結果の一部は、既に報告したので²²⁾、ここでは主に、まだ報告していない結果について述べる。

ブレード線は、厚さ0.8mm、幅7mmで、97本の極細多芯線 (NbTi, 以下 FM 線) を編み上げたものである。各 FM 線の直径は0.3mm 銅比は1である。線間の空間は半田でうめてあり、液体ヘリウムが線の

Fig. 10 Sample holder used to measure quench currents of a superconducting braid.

間に入っていくことができないので、導体冷却は不十分な構造である。

実験に使用したヘアピンタイプの試料ホルダーを、Fig. 10に示す²⁷⁾。ホルダー中の導体の形状をFig. 11に示す。導体の水平部の磁場が最大になる様に、ビッターソレノイドのボアー中にセットした。磁場の方向は、試料の広い面に垂直である。5対の電圧タップと、1個のAEセンサーを取り付けた(Fig. 10)。

クエンチ電流の測定は次の様にして行った。磁場を一定に設定し(例えば 5 T)、試料電流を 0 A からクエンチ電流まで、 50 As^{-1} の掃引速度で、増加させた。クエンチ電流 I_q が、予想される臨界電流値 I_c (5, 500 A) になるまで励磁をくり返した。 I_q が I_c に達するまでに、トレーニングが必要であった(Fig. 12)。

I_c 以下でクエンチする場合、クエンチの直前(約 1 ms)に電圧パルスと AE のバーストが同時に現われた。これは Turowski が示唆した様に²⁸⁾、クエンチが線の動き(スリップ)により誘起されていることを、示している。このスリップの変位量は、 $1 \mu\text{m}$ であるから、マイクロスリップであると考えられる。

Fig. 12のトレーニングの間に得られた電圧パルスをFig. 13に示す。1本1本のパルスがマイクロスリップ

Fig. 11 Contour of the braid in the sample holder and locations of voltage taps.

Fig. 12 Training sequence of the quench current data for a braided superconductor.

を表わしている。さらに、この内の1つのパルスを取り出して Fig. 14(a) に示す。上の図は AE 信号(飽和している)、下の図は電圧信号(V_5)であり、時間軸は 0.2 ms/div. である。比較のために、このブレイドについて、摩擦試験(Fig. 1)により求めた、マイク

Fig. 13 Voltage spikes vs. transport current for eight consecutive runs of Fig. 12. Each vertical bar represents one microslip event.

コイロスリップの信号を Fig. 14(b) に示す。上は、サーチルの出力電圧、下は AE 信号である。時間軸は Fig. 14 (a) と同一である。両方の図は、信号の形、持続時間などが極めて良く一致しており、Fig. 13 の電圧パルスがマイクロスリップである事を良く示している。Fig. 13 より本実験の場合にも、Fig. 9 と同様なマイクロスリップのトレーニングが生じているのが明らかである。電磁力 F_L は Fig. 10 の様にクランプ力 F_n に抗して、ブレイド線を動かそうとする。 F_L は、電流値に比例しているので、電流の増加に伴い、 F_L も増加して、マイクロスリップが発生する。電流が I_c よりかなり小さい領域では、温度マージンが十分大きいのでマイクロスリップ程度の発熱ではクエンチが生じない。電流が I_c に近づいていくと、温度マージンが小さくなっていくためにマイクロスリップの発熱でもクエンチを起こし得るようになる。それでもすべてのマイクロスリップが、クエンチをおこす訳ではなく、スリップが小さすぎたり、発生場所付近の冷却が良いと、クエンチは起きない。2 度目の励磁では、電流が 1 回目の I_q を越えた直後に、マイクロスリップが発生し始める。同様なことが、 I_q が I_c に達するまで繰り返される。Fig. 13 は、高電流密度で、冷却の良くない超電導マグネットでは、マイクロスリップは、トレーニング現象を引き起こす重要な現象であることを良く示している。

4.3 摩擦による擾乱の変位量対速度空間での表示

Fig. 14(a) Oscillogram of a voltage spike observed in the training sequence of Fig. 13. The top trace: an AE sensor output; the bottom trace: voltage output (V_s). Time scale: 0.2 ms/div.
(b) Oscillograms of a microslip event for the braid/G-705 pair, obtained by friction experiment. The top trace: extensometer output; the bottom trace: AE sensor output. Time scale: 0.2 ms/div.

擾乱を定量化するに当って重要な量は、第 1 に大きさであり、第 2 に持続時間である。これは、冷却が、時間依存性をもつからである。短い時間領域では、冷却は過渡現象に支配されており、長い時間領域では定常現象に支配されている。両者の境界は、1~100 ms にある。持続時間の短い擾乱の場合、大切な量は単位面積または単位体積当りのエネルギーである。他方、長い持続時間の擾乱では、単位面積当りまたは単位体積当りのパワーが大切である。

エネルギーは、「力×距離」で与えられ、パワーは

Fig. 15 Macroscopic and microscopic frictional disturbances in distance—velocity space. (1) Copper/paraffin-coated G-10; (2) Copper/epoxy-coated G-10; (3) Copper/G-10 (skin); (4) Soldered copper/G-10 (skin); (5) Copper/G-10 (machined); (6) Copper/teflon; (7) Braided conductor/G-705 (friction experiment); (8) Braided conductor/G-705 (quench current experiment).

「力×速度」で与えられるので、スリップを変位対速度空間に表示すると、その大きさを把握する上で便利である(Fig. 15)。

種々の組合せのマイクロスリップを表示すると、図に示す4本の線で囲まれた領域の中にあることがわかる。この領域は、マイクロスリップによる変位量、運動速度の、大まかな目安を与えるものである。ちなみに変位量は $0.3 \sim 6 \mu\text{m}$ 、ピーク速度は $10^{-3} \sim 4 \times 10^{-2} \text{ ms}^{-1}$ である。実験した組み合わせの中では#5で示された、銅/表面加工G10が最小のエネルギーとパワーをもつ事がわかる。

摩擦による擾乱には、マイクロスリップの他に、次の様な macroscopic な不安定運動がある。(1)stick-slip²³⁾, (2)銅/表面加工G10にみられる first slip, (3) take off 後の速いスリップ。これには、Fig. 15の直交する2本の線で示される領域を占めるものと考えられる。この場合、変化量と速度の上限は、実験系の幾何学的形状に支配されるものであり、一意的に定めることはできない。

4.4 材料選択に当たっての基準

Fig. 15は、高電流密度で冷却の悪いマグネットを、製作するに当たって、摩擦による擾乱をできるだけ低くおさえる様な、金属/絶縁材料の組み合わせを選択する上での基準を与えるものである。

摩擦による擾乱を減らすための基本的な考え方は、Fig. 15から明らかであり、次の様になる。(1)マイクロスリップを最小にする(図の左下に対応)、(2)macroscopic な不安定性を取り除く。

銅/表面加工G10ではマイクロスリップの大きさは最小である。ところがこの組み合わせではmacroscopic な不安定性 (first slip) が発生する。表面に、有機材料を塗布すると macroscopic な不安定性を、取り除く事ができるが、同時にFig. 15の#1, #2に示した様に、マイクロスリップの大きさは増加してしまう。

この様に、上述の両条件を同時に満足する事は、必ずしも容易ではない。マイクロスリップに対しては、(i)マイクロスリップを冷やし込める程度に冷却を十分取る、(ii)モノリス導体の様に、硬く曲がりにくい導体

を使用して発熱の集中を防ぐ、と言った対策によりマグネットがクエンチに到るのを防ぐことができる。そこで材料を選択するにあたっては、マイクロスリップよりはるかに大きな熱エネルギーを生じる所の macroscopic な不安定性を取り除くことを、最も重視することが必要である。

5. 結 論

(1) 摩擦運動は、microscopic な現象 (マイクロスリップ) と macroscopic な現象 (macroscopic に不安定なスリップ) の 2 種類の現象から成り立っている。マイクロスリップは、摩擦運動に伴う本質的な現象であるが、大変微小なものであるから、摩擦運動の極めて初期の時期にのみ、明確に観測することができる。マイクロスリップの様な微小運動が、超電導マグネットの安定性に影響を与えるのは、材料の熱容量が、4.2K で極めて小さいからである。

(2) マイクロスリップによる熱エネルギーやパワーは、金属/絶縁材料の組み合わせにより著しく異なっている。材料の選択に当っては、(a) マイクロスリップの大きさを小さくする事、(b) macroscopic な不安定性が生じない様にする事などに注意する必要がある。

(3) macroscopic な不安定性が、超電導マグネット内部に発生しない様に、十分配慮しなければならない。実験によれば、有機材料の表面塗布は、この目的のために有効である。

本研究は米国 DOE, Fossil Energy/MHD Program の援助により、MIT Francis Bitter National Magnet Laboratory において、行ったものである。実験に協力いただいた、V. Brandeo 氏、C. Fallon 嬢、L. Paz 氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) C. Schmidt: Appl. Phys. Lett. 28 (1976).
- 2) D.S. Easton, D.M. Kroeger, and A. Moazed: Appl. Phys. Lett. 29 (1976) 382.
- 3) C.H. Dustmann and Kofler: Cryogenics 17 (1977) 667.
- 4) C. Schmidt and B. Turck: Cryogenics 17 (1977) 695.
- 5) G. Patztor and C. Schmidt: J. Appl. Phys. 49 (1978) 886.
- 6) G. Patztor and C. Schmidt: J. Mat. Sci. (1981) 16.
- 7) Superconducting Application Group, Rutherford Laboratory: J. Phys. D3 (1970) 1517.
- 8) K. Kuroda: Cryogenics 15 (1975) 675.
- 9) D. Evans and B.F. Colyer: Proc. 6th Int. Cryogenics Eng. Conf. Ed. K. Mendelssohn (IPC Science and Technology Press, Surrey, England), (1976) 473.
- 10) T. Okada, S. Nishijima, and T. Horiuchi: IEEE Trans. Magn. MAG-17, (1981) 1052.
- 11) P.F. Smith and B. Colyer: Cryogenics 15 (1975) 201.
- 12) M.N. Wilson, R.B. Hopes and R.L. Roberts: MT-5 (1975) 511.
- 13) H. Maeda and Y. Iwasa: Cryogenics, (1982) 473.
- 14) Y. Iwasa: Proceedings of 1978 Superconducting MHD Magnet Design Conference, A.D. Dawson, Ed. Francis Bitter National Magnet Laboratory, M.I.T. (1978) 219.
- 15) H. Maeda, J.F. Maguire, O. Tsukamoto, N. Tamada, and Y. Iwasa: "9th Engineering Problem of Fusion Research," (1982) 623.
- 16) 前田, 塚本, 玉田, 岩佐: 低温工学「超電導マグネットに生ずる機械的擾乱(Ⅲ)」
- 17) H. Maeda, O. Tsukamoto and Y. Iwasa: Cryogenics, (1982) 287.
- 18) Y. Iwasa, R.S. Kensley and J.E.C. Williams: IEEE Trans. Magn. MAG-15 (1979) 36
- 19) R.S. Kensley and Y. Iwasa: Cryogenics 20 (1980) 25.
- 20) R.S. Kensley, H. Maeda and Y. Iwasa: Cryogenics 21 (1981) 479.
- 21) R.S. Kensley, H. Maeda and Y. Iwasa: IEEE Trans. Magn. MAG-17, (1981) 1068.
- 22) O. Tsukamoto, H. Maeda and Y. Iwasa: Appl. Phys. Lett. 39 (1981) 918.
- 23) E. Rabinowicz: *Friction and Wear of Materials*, John Wiley and Sons, New York (1965).
- 24) M.E. Campbell, J.B. Loser and E. Sneegas: NASA SP-5059 (1966).
- 25) F.P. Bowden and D. Tabor: *The Friction and Lubrication of Solids* Pt. II. Oxford University Press (1964).

- 26) C. Schmidt and G. Pasztor: IEEF Trans. MAG-13 (1977) 116.
- 27) O. Tsukamoto. J.F. Maguire. E.S. Bobrov, and Y. Iwasa: Appl Phys. Lett. **39** (1981). 172.
- 28) P. Turowski: MT-6 (1978) 648.